

Uniwersytet Śląski  
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych

**dr inż. Krzysztof Aniolek**

Załącznik nr 3  
Autoreferat przedstawiający opis całego dorobku  
i osiągnięć naukowych

Chorzów 2020

## Spis treści

1. Imię i nazwisko .....	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.....	3
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.	3
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy .....	4
4.1. Wykaz publikacji będących podstawą osiągnięcia naukowego .....	4
4.2. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników .....	12
4.2.1. Wprowadzenie .....	12
4.2.2. Omówienie najważniejszych wyników badań .....	15
4.2.3. Podsumowanie .....	23
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.....	24
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.....	31
7. Inne informacje dotyczące kariery zawodowej .....	33

**1. Imię i nazwisko**

Krzysztof Aniołek

**2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej**

- 2009           Doktor nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa -  
Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Katowice  
Tytuł pracy doktorskiej: *Wpływ morfologii perlitu w stali na odporność na zużycie ściernie kształowników klockowych stosowanych w rozjazdach kolejowych*  
Promotor: dr hab. inż. Jerzy Herian, prof. PŚ  
Recenzent: prof. dr hab. inż. Jerzy Okrajni  
Recenzent: dr hab. inż. Zbigniew Stradomski, prof. PCz  
Data uzyskania stopnia doktora: 17.11.2009
- 2003           Magister inżynier w zakresie inżynierii materiałowej, specjalność: inżynieria powierzchni  
Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Katowice  
Temat pracy dyplomowej magisterskiej: *Technologia wytwarzania powłok zanurzeniowych w kąpielach 55% Al-Zn*  
Promotor: dr inż. Jacek Mendala

**3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych**

- 2010-obecnie           Uniwersytet Śląski  
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych  
Instytut Inżynierii Materiałowej  
Stanowisko: adiunkt
- 2004-2009           Politechnika Śląska  
Wydział Transportu  
Katedra Transportu Szynowego  
Stanowisko: doktorant

#### 4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy

Osiągnięciem naukowym, uzyskanym po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiącym znaczny wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria materiałowa, określonym w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy, jest jednotematyczny cykl publikacji zatytułowany:

*„Modyfikacja powierzchni tytanu Grade 2 oraz stopu Ti-6Al-7Nb w procesie utleniania izotermicznego”*

Cykl ten tworzy 14 oryginalnych publikacji naukowych. W tym dwie publikacje są publikacjami monoautorskimi.

##### 4.1. Wykaz publikacji będących podstawą osiągnięcia naukowego

(\* autorstwo korespondencyjne dr inż. K. Aniołek)

###### H1. K. Aniołek\*,

*Structure and properties of titanium and the Ti-6Al-7Nb alloy after isothermal oxidation,*

Surface Engineering 36 (8) (2020) 847–858.

<https://doi.org/10.1080/02670844.2020.1711631>

**MNiSW: 70, IF<sub>2019</sub>: 2,433, 5-letni IF<sub>2019</sub>: 2,118**

*Publikacja monoautorska*

*Określono kinetykę utleniania tytanu Grade 2 oraz biomedycznego stopu Ti-6Al-7Nb w zakresie temperatury 600-800°C. Stwierdzono, że skład fazowy warstw tlenkowych otrzymanych na stopie Ti-6Al-7Nb był bardziej złożony w porównaniu do tytanu Grade 2. Wykazano, że zgorzeliny tlenkowe na tytanie posiadały ok. 6-krotnie większą grubość. Wyznaczono wartości współczynnika Pilling-Bedworth dla tlenków uzyskanych podczas utleniania badanych materiałów. Stwierdzono, że wartości współczynnika PB mieściły się w optymalnym zakresie (1-2), co oznacza, że otrzymane warstwy tlenkowe posiadały dobre właściwości ochronne.*

*W ramach części doświadczalnej pracy opracowałem plan badań eksperymentalnych. Uczestniczyłem w badaniach na skaningowym mikroskopie elektronowym. Określiłem morfologię oraz grubość warstw tlenkowych. Wykonałem badania kinetyki utleniania oraz obliczenia współczynnika Pilling-Bedworth. Uczestniczyłem w badaniach XRD. Wykonałem pomiary twardości oraz testy tribologiczne. Kierowałem całością prac eksperymentalnych, opracowałem uzyskane wyniki oraz przygotowałem tekst publikacji.*

H2. **K. Aniołek\***, M. Kupka, A. Barylski, G. Dercz,

*Mechanical and tribological properties of oxide layers obtained on titanium in the thermal oxidation process,*

Applied Surface Science 357 (2015) 1419–1426.

<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.09.245>

**MNiSW: 35, IF<sub>2015</sub>: 3,150, 5-letni IF<sub>2015</sub>: 2,982**

*Opisano kinetykę utleniania tytanu Grade 2 w zakresie temperatury 600-800°C. Wyznaczono wartości stałej parabolicznej szybkości utleniania  $K_p$  oraz energii aktywacji. Określono różnice morfologiczne pomiędzy wytworzonymi warstwami tlenkowymi. Na podstawie wyników analizy rentgenowskiej wykazano, że dominującym tlenkiem w utworzonych warstwach powierzchniowych był  $TiO_2$  (rutyl). Stwierdzono, że obecność warstw tlenkowych na powierzchni tytanu w sposób znaczący poprawiła odporność na zużycie ściernie.*

*Dobrałem parametry procesu utleniania izotermicznego oraz wykonałem badania kinetyki utleniania metodą grawimetryczną. Uczestniczyłem w badaniach mikroskopowych oraz rentgenowskich. Wykonałem pomiary twardości oraz badania tribologiczne. Kierowałem całością badań eksperymentalnych, opracowałem uzyskane wyniki oraz przygotowałem tekst publikacji. Swoją udział procentowy szacuję na 70%.*

H3. **K. Aniołek**, M. Kupka, M. Łuczuk, A. Barylski,

*Isothermal oxidation of Ti-6Al-7Nb alloy,*

Vacuum 114 (2015) 114-118.

<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2015.01.016>

**MNiSW: 25, IF<sub>2015</sub>: 1,558, 5-letni IF<sub>2015</sub>: 1,615**

*Opracowano optymalne warunki procesu utleniania izotermicznego stopu Ti-6Al-7Nb. Badania kinetyki utleniania wykonano metodą grawimetryczną. Wyznaczono wartości stałej parabolicznej szybkości utleniania  $K_p$  oraz energii aktywacji. Określono skład fazowy otrzymanych warstw tlenkowych. W badaniach wykazano, że dodatek niobu w ilości 7% wag. utrudnia dyfuzję tlenu w stopie Ti-6Al-7Nb, opóźniając w ten sposób proces utleniania.*

*Opracowałem koncepcję badań pracy. Uczestniczyłem w badaniach mikroskopowych i rentgenowskich. Wykonałem badania kinetyki utleniania. Kierowałem całością prac eksperymentalnych, opracowałem uzyskane wyniki oraz przygotowałem tekst publikacji. Swoją udział procentowy szacuję na 70%.*

H4. **K. Aniołek\***, M. Kupka, A. Barylski, Ł. Mieszczak,

*Characteristic of oxide layers obtained on titanium in the process of thermal oxidation,*  
Archives of Metallurgy and Materials 61 (2) (2016) 853–856.

<https://doi:10.1515/amm-2016-0144>

**MNiSW: 30, IF<sub>2016</sub>: 0,571, 5-letni IF<sub>2016</sub>: 0,776**

Zbadano morfologię otrzymanych warstw tlenkowych. Stwierdzono, że po utlenianiu w temperaturze 700°C ziarna tlenków były większe i składały się z wielu cząstek o nanometrycznej wielkości. Na podstawie krzywych kinetycznych wykazano, że ok. 3-krotnie intensywniejszy wzrost fazy tlenkowej wystąpił w temperaturze 700°C. Stwierdzono, że w powstałych warstwach utworzyły się tlenki tytanu w postaci: TiO<sub>2</sub> (rutyl) i Ti<sub>3</sub>O.

Opracowałem koncepcję badań pracy. Przeprowadziłem badania kinetyki utleniania. Uczestniczyłem w badaniach XRD. Wykonałem pomiary twardości. Kierowałem całością prac eksperymentalnych, opracowałem uzyskane wyniki oraz przygotowałem tekst publikacji. Mój wkład w powstanie tej publikacji wynosi 75%.

H5. **K. Aniołek\***,

*The influence of thermal oxidation parameters on the growth of oxide layers on titanium,*

Vacuum 144 (2017) 94-100.

<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.07.023>

**MNiSW: 25, IF<sub>2017</sub>: 2,067, 5-letni IF<sub>2017</sub>: 1,867**

*Publikacja monoautorska*

Ustalono wpływ parametrów temperaturowo-czasowych na proces wzrostu, grubość, właściwości mechaniczne oraz chropowatość warstw tlenkowych otrzymanych na tytanie Grade 2. Stwierdzono, że twardość warstw tlenkowych malała wraz z oddalaniem się od powierzchni. Wykazano, że podwyższona twardość poniżej wytworzonych zgorzelin związana była z obecnością tzw. dyfuzyjnej strefy przejściowej. Ponadto stwierdzono, że wzrost temperatury utleniania był czynnikiem intensywnie zwiększającym chropowatość powierzchni. Opracowałem plan badań. Wykonałem obserwacje na mikroskopie świetlnym oraz badania kinetyki utleniania. Uczestniczyłem w badaniach XRD. Wykonałem pomiary nanotwardości oraz chropowatości powierzchni. Kierowałem całością prac eksperymentalnych, opracowałem uzyskane wyniki oraz przygotowałem tekst publikacji.

H6. **K. Aniołek\***, A. Barylski, M. Kupka,

*Modelling the structure and mechanical properties of oxide layers obtained on biomedical Ti-6Al-7Nb alloy in the thermal oxidation process,*

Vacuum 154 (2018) 309–314.

<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.05.028>

**MNiSW: 25, IF<sub>2018</sub>: 2,515, 5-letni IF<sub>2018</sub>: 2,053**

*Kształtowano strukturę i właściwości warstw tlenkowych otrzymanych na stopie Ti-6Al-7Nb. Dobrano optymalne warunki utleniania. Wykazano, że proces utleniania izotermicznego stopu Ti-6Al-7Nb przebiegał zgodnie z parabolicznym prawem utleniania. Stwierdzono, że istotniejszy wpływ na intensywność tworzenia się warstw tlenkowych miała temperatura. Wykazano, że wzrostowi temperatury utleniania stopu Ti-6Al-7Nb towarzyszyło stopniowe obniżanie parametrów wytrzymałościowych i plastycznych.*

*Opracowałem plan badań eksperymentalnych. Wykonałem badania kinetyki utleniania. Uczestniczyłem w badaniach na skaningowym mikroskopie elektronowym. Określiłem grubość warstw tlenkowych. Wykonałem badania właściwości mechanicznych (nanotwardość, statyczna próba rozciągania). Kierowałem całością prac eksperymentalnych, opracowałem uzyskane wyniki oraz przygotowałem tekst publikacji. Mój wkład w powstanie tej publikacji wynosi 75%.*

H7. **K. Aniołek\***, M. Kupka,

*Mechanical, tribological and adhesive properties of oxide layers obtained on the surface of the Ti-6Al-7Nb alloy in the thermal oxidation process,*

Wear 432-433 (2019) 202929.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202929>

**MNiSW: 200, IF<sub>2019</sub>: 4,108, 5-letni IF<sub>2019</sub>: 4,169**

*Wyznaczono charakterystyki mechaniczne, tribologiczne i adhezyjne warstw tlenkowych otrzymanych na powierzchni stopu Ti-6Al-7Nb do zastosowań medycznych. W badaniach wykazano związek pomiędzy parametrami temperaturowo-czasowymi procesu utleniania, przyczepnością warstw tlenkowych a odpornością na zużycie ścierne. Stwierdzono, że największą odpornością na zużycie ścierne charakteryzowała się warstwa tlenkowa o najlepszej przyczepności, którą uzyskano po utlenianiu w temperaturze 700°C. Wykazano, że obecność warstw tlenkowych na badanym stopie miała również korzystny wpływ na*

ograniczenie do 86% zużycia kulek  $ZrO_2$ , stanowiących przeciwpróbkę w testach tribologicznych.

Opracowałem koncepcję badań. Wykonałem pomiary twardości oraz testy tribologiczne. Uczestniczyłem w badaniach mikroskopowych, adhezyjnych, rentgenowskich oraz struktury geometrycznej powierzchni. Wykonałem zdjęcia powierzchni rys po teście zarysowania na mikroskopie świetlnym. Kierowałem całością prac eksperymentalnych, opracowałem uzyskane wyniki oraz przygotowałem tekst publikacji. Mój wkład w powstanie tej publikacji szacuję na 85%.

H8. **K. Aniołek\***, M. Kupka, A. Barylski,

*Sliding wear resistance of oxide layers formed on a titanium surface during thermal oxidation,*

Wear 356-357 (2016) 23–29.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.007>

**MNiSW: 35, IF<sub>2016</sub>: 2,531, 5-letni IF<sub>2016</sub>: 2,798**

W pracy określono właściwości mechaniczne i tribologiczne warstw tlenkowych otrzymanych na tytanie w procesie utleniania izotermicznego w temperaturze 600 i 700°C. Stwierdzono 5-krotny wzrost twardości powierzchni po utlenianiu, co bezpośrednio przekładało się na poprawę właściwości tribologicznych tytanu Grade 2. Wykazano, że wytworzenie warstw tlenkowych na powierzchni tytanu, prowadziło do redukcji zużycia objętościowego kulek  $Al_2O_3$  (przeciwpróbki w testach tribologicznych) nawet do 65%.

Mój wkład polegał na opracowaniu planu badań eksperymentalnych. Uczestniczyłem w badaniach mikroskopowych i rentgenowskich. Określiłem zależność twardości warstw tlenkowych na tytanie od wielkości obciążenia wgłębnika. Wykonałem testy tribologiczne. Kierowałem całością prac eksperymentalnych, opracowałem uzyskane wyniki oraz przygotowałem tekst publikacji. Swój udział procentowy szacuję na 80%.

H9. **K. Aniołek\***, A. Barylski, M. Kupka, J. Tylka,

*The influence of thermal oxidation parameters on structural, friction, and wear characteristics of oxide layers produced on the surface of Ti–6Al–7Nb alloy,*

Journal of Tribology 141 (2019) 031605-1-031605-9.

<https://doi.org/10.1115/1.4042001>

**MNiSW: 100, IF<sub>2019</sub>: 1,829, 5-letni IF<sub>2019</sub>: 1,887**



*W pracy kształtowano charakterystyki tribologiczne warstw tlenkowych otrzymanych na biomedycznym stopie Ti-6Al-7Nb. Wykazano, że proces utleniania izotermicznego pozwolił na zmniejszenie zużycia liniowego i objętościowego stopu Ti-6Al-7Nb (nawet o 83%). Obecność zgorzeliny tlenkowej na powierzchni badanego stopu miała również korzystny wpływ na redukcję zużycia kulek  $Al_2O_3$  (do 90%).*

*Opracowałem koncepcję badań. Uczestniczyłem w obserwacjach mikroskopowych. Wykonałem pomiary twardości oraz określiłem grubość wytworzonych warstw tlenkowych. Przeprowadziłem badania tribologiczne. Uczestniczyłem w badaniach struktury geometrycznej śladów zużycia. Kierowałem całością prac eksperymentalnych, opracowałem uzyskane wyniki oraz przygotowałem tekst publikacji. Swoją udział procentowy szacuję na 70%.*

H10. **K. Aniołek\***, M. Kupka, A. Barylski,

*Characteristics of the tribological properties of oxide layers obtained via thermal oxidation on titanium Grade 2,*

*Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology 233(1) (2019) 125–138.*

<https://doi.org/10.1177%2F1350650118769116>

**MNiSW: 70, IF<sub>2019</sub>: 1,397, 5-letni IF<sub>2019</sub>: 1,542**

*Określono właściwości tribologiczne tytanu Grade 2 w stanie dostawy oraz po utlenianiu izotermicznym w temperaturze 600 i 700°C. Stwierdzono, że obecność warstw tlenkowych na powierzchni tytanu w sposób znaczący poprawiła odporność na zużycie ściernie współpracującej pary ciernej (titan— $Al_2O_3$ ). Analiza obrazów izometrycznych 3D oraz zdjęć mikroskopowych powierzchni tarcia wykazała obecność naprzemianległych, różnych pod kątem morfologicznym obszarów powstałych w wyniku tzw. zużycia falistego (w szczególności na próbce nieutlenionej). Wykazano po raz pierwszy, że warstwy tlenkowe otrzymane w temperaturze 700°C całkowicie eliminują to niekorzystne zjawisko.*

*Opracowałem koncepcję badań pracy. Uczestniczyłem w badaniach mikroskopowych, na podstawie których określiłem grubość warstw tlenkowych. Wykonałem testy tribologiczne. Uczestniczyłem w badaniach śladów zużycia przy wykorzystaniu profilografometru 3D. Brałem udział w obserwacjach mikroskopowych oraz opracowaniu map EDS. Kierowałem całością prac eksperymentalnych, opracowałem uzyskane wyniki oraz przygotowałem tekst publikacji. Mój wkład w powstanie tej publikacji wynosi 80%.*

H11. **K. Aniołek\***, M. Kupka,

*Surface characterization of thermally oxidized Ti-6Al-7Nb alloy,*

Materials Chemistry and Physics 171 (2016) 374-378.

<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.01.031>

**MNiSW: 30, IF<sub>2016</sub>: 2,084, 5-letni IF<sub>2016</sub>: 2,283**

*Przedstawiono analizę strukturalną, mechaniczną i adhezyjną warstw tlenkowych otrzymanych w procesie utleniania izotermicznego na powierzchni biomedycznego stopu Ti-6Al-7Nb. W badaniach wykonanych techniką nanoindentacji wykazano, że wytworzone warstwy tlenkowe cechowały się ponad dwukrotnie większą twardością oraz wyższym modulem sprężystości w porównaniu do stopu Ti-6Al-7Nb w stanie wyjściowym. Po utlenianiu izotermicznym stwierdzono ponadto zmniejszenie wartości stosunku  $E_r/H$ .*

*Opracowałem koncepcję badań. Uczestniczyłem w badaniach mikroskopowych, adhezyjnych, rentgenowskich oraz nanoindentacji. Wykonałem zdjęcia mikroskopowe powierzchni rys po testach adhezyjnych. Kierowałem całością prac eksperymentalnych, opracowałem uzyskane wyniki oraz przygotowałem tekst publikacji. Swój udział procentowy szacuję na 90%.*

H12. **K. Aniołek\***, A. Barylski, M. Kupka, I. Leszek,

*The tensile properties, scratch behaviors and sliding wear of oxide scale formed on titanium Grade 2,*

Materials 13 (2020) 3048.

<https://doi.org/10.3390/ma13143048>

**MNiSW: 140, IF<sub>2019</sub>: 3,057, 5-letni IF<sub>2019</sub>: 3,424**

*Określono właściwości mechaniczne, adhezyjne i tribologiczne warstw tlenkowych otrzymanych na powierzchni tytanu Grade 2 w procesie utleniania izotermicznego. Wykazano, że najlepsze właściwości adhezyjne posiadały warstwy tlenkowe otrzymane w temperaturze 700°C (72 h) i 800°C (2 i 6 h). Stwierdzono, że powierzchnia tytanu Grade 2 po utlenianiu izotermicznym charakteryzowała się korzystniejszymi właściwościami tribologicznymi dla obu zastosowanych par ciernych ( $Al_2O_3$ , stal 100Cr6). Wykazano, że maksymalna redukcja zużycia objętościowego utlenionej tarczy z tytanu podczas współpracy z kulkami  $Al_2O_3$  wynosiła ok. 79%, a z kulkami 100Cr6 ok. 96%.*

*Opracowałem koncepcję badań niniejszej pracy. Uczestniczyłem w badaniach mikroskopowych oraz odporności na zarysowanie. Wykonałem testy mechaniczne na maszynie wytrzymałościowej. Zrealizowałem badania tribologiczne oraz chropowatości powierzchni.*

*Kierowałem całością prac eksperymentalnych, opracowałem uzyskane wyniki oraz przygotowałem tekst publikacji. Mój udział procentowy w pracy szacuję na 70%.*

H13. **K. Aniołek\***, A. Barylski, M. Kupka, G. Dercz,

*Cyclic oxidation of titanium Grade 2,*

*Materials 13 (2020) 5431.*

<https://doi.org/10.3390/ma13235431>

**MNiSW: 140, IF<sub>2019</sub>: 3,057, 5-letni IF<sub>2019</sub>: 3,424**

*W pracy utleniało cyklicznie tytan Grade 2 w temperaturze 600, 650 i 700°C. Stwierdzono, że proces utleniania cyklicznego charakteryzował się większą intensywnością, a otrzymane warstwy tlenkowe posiadały większą grubość w porównaniu do metody utleniania izotermicznego. W badaniach składu fazowego wykazano, że wytworzone warstwy tlenkowe złożone były tylko z tlenku TiO<sub>2</sub> (rutylu).*

*Opracowałem plan badań niniejszej pracy. Wykonałem badania kinetyki utleniania. Uczestniczyłem w badaniach mikroskopowych oraz rentgenowskich. Określiłem grubość warstw tlenkowych. Wykonałem badania twardości w zależności od obciążenia węglownika. Kierowałem całością prac eksperymentalnych, opracowałem uzyskane wyniki oraz przygotowałem tekst publikacji. Mój udział procentowy w pracy szacuję na 70%.*

H14. **K. Aniołek\***, M. Kupka, G. Dercz,

*Cyclic oxidation of Ti–6Al–7Nb alloy,*

*Vacuum 168 (2019) 108859.*

<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.108859>

**MNiSW: 70, IF<sub>2019</sub>: 2,906, 5-letni IF<sub>2019</sub>: 2,425**

*Określono kinetykę utleniania cyklicznego stopu Ti-6Al-7Nb. Stwierdzono, że proces utleniania cyklicznego przyczynił się do uzyskania większych wartości stałej parabolicznej szybkości utleniania  $K_p$  w porównaniu do metody utleniania izotermicznego. Ponadto wykazano, że proces utleniania cyklicznego pozwolił na otrzymanie warstw tlenkowych o większej grubości. Opracowałem plan badań eksperymentalnych. Wykonałem badania kinetyki utleniania. Uczestniczyłem w badaniach mikroskopowych, na podstawie których określiłem morfologię i grubość warstw tlenkowych. Uczestniczyłem w analizach SEM EDS oraz XRD. Kierowałem całością prac eksperymentalnych, opracowałem uzyskane wyniki oraz przygotowałem tekst publikacji. Mój udział procentowy w pracy wynosi 75%.*

**Dane bibliograficzne cyklu publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe**

Całkowita liczba publikacji:	14
Suma punktów MNiSW:	995
Sumaryczny IF wg listy JCR (zgodnie z rokiem opublikowania):	33,263
Sumaryczny 5-letni IF wg listy JCR (zgodnie z rokiem opublikowania):	33,363
Liczba cytowań wg Web of Science Core Collection*:	118 (89)
Liczba cytowań wg Scopus*:	142 (111)
Suma cytowań wg Web of Science Core Collection i Scopus*:	147 (115)
Liczba cytowań wg Google Scholar*:	176 (144)

\*wartości w nawiasach przedstawiają cytowania z wyłączeniem autocytowań (dane na dzień 03.12.2020)

**4.2. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników****4.2.1. Wprowadzenie**

Dynamiczny rozwój techniki i medycyny wymusza poszukiwanie nowych, bądź ulepszanie istniejących materiałów, które będą w stanie sprostać nieustannie rosnącym wymaganiom w zakresie właściwości użytkowych. Wymagania te wymuszają stosowanie coraz to bardziej zaawansowanych materiałów wykazujących korzystniejsze charakterystyki mechaniczne i zmęczeniowe, zwiększoną odporność na korozję oraz na zużycie w warunkach tarcia. Perspektywnym kierunkiem są również prace badawcze mające na celu podwyższenie właściwości użytkowych materiałów inżynierskich i biomedycznych poprzez modyfikację warstwy wierzchniej lub wytwarzanie powłok o korzystnych właściwościach fizykochemicznych i mechanicznych.

Tytan i jego stopy należą do grupy materiałów metalicznych cechujących się ponadprzeciętnymi właściwościami użytkowymi. Połączenie niskiej gęstości, dobrej odporności korozyjnej z dobrą plastycznością i właściwościami mechanicznymi, decyduje o szerokim zastosowaniu tych materiałów. Przewyższają one pod wieloma względami dotychczas stosowane materiały konstrukcyjne i znajdują zastosowanie zarówno w technice jak i medycynie. O przydatności tytanu i jego stopów w branży biomedycznej decyduje ich bardzo dobra odporność korozyjna w środowisku tkankowym oraz wiążąca się z tym najlepsza spośród materiałów metalicznych biokompatybilność.

Jednym z podstawowych ograniczeń w zastosowaniach technicznych i biomedycznych materiałów na bazie tytanu są ich niewystarczające właściwości tribologiczne, co znacznie ogranicza lub w niektórych przypadkach całkowicie wyklucza zastosowanie w węzłach tarcia. Zasadniczym problemem jest wysoki i niestabilny współczynnik tarcia oraz skłonność do

zużycia adhezyjnego, co prowadzi do awarii we wczesnym etapie eksploatacji. W zastosowaniach biomedycznych z kolei niska odporność na zużycie ściernie jest zjawiskiem wysoce niekorzystnym prowadzącym m.in. do obłuzowania endoprotez stawów. Procesy degradacji spowodowane zużyciem tribologicznym są częstą przyczyną operacji rewizyjnych implantów.

Analiza wyników dotychczasowych prac badawczych wskazuje, że został już osiągnięty pewien pułap optymalizacji właściwości biologicznych, mechanicznych i tribologicznych materiałów tytanowych przez opracowanie optymalnego składu chemicznego i fazowego oraz wykorzystanie metod obróbki plastycznej i cieplnej. W celu uzyskania dalszej poprawy rezultatów aplikacyjnych, konieczna jest implementacja osiągnięć inżynierii powierzchni, co sprzyja generowaniu nowych jakościowo rozwiązań technicznych oraz podwyższa niezawodność implantów wytwarzanych z tradycyjnych biomateriałów metalicznych. Rozwój i zastosowanie metod z zakresu inżynierii powierzchni tworzy zupełnie nowe obszary potencjalnych zastosowań dla tytanu i jego stopów. Problem modyfikacji powierzchni tych materiałów w dalszym ciągu pozostaje otwarty i wymaga szczegółowych badań obejmujących strukturalną charakterystykę otrzymanych warstw wierzchnich oraz ich właściwości użytkowe.

W celu poprawy właściwości mechanicznych, tribologicznych, odporności korozyjnej oraz biogodności tytanu i jego stopów, wykorzystuje się różne metody uszlachetniania powierzchni, które pozwalają na wytwarzanie powłok o szerokim spektrum właściwości. Najczęściej stosowanymi technikami inżynierii powierzchni są: anodowanie, implantacja jonów, azotowanie jarzeniowe, obróbka laserowa, metody natryskiwania cieplnego, PVD (Physical Vapour Deposition), CVD (Chemical Vapour Deposition) oraz metody typu zol-żel. Jedną z najskuteczniejszych, a zarazem tanich technik umożliwiających poprawę biokompatybilności oraz właściwości mechanicznych i tribologicznych tytanu i jego stopów jest utlenianie izotermiczne. Wyniki badań naukowych jednoznacznie wskazują, że proces utleniania izotermicznego może stanowić w pewnych warunkach bardziej skuteczną metodę ochrony przed zużyciem tribologicznym materiałów tytanowych niż np. azotowanie jarzeniowe. Metoda ta wykorzystuje zjawisko dyfuzji tlenu w podwyższonych temperaturach i umożliwia utwardzanie warstwy wierzchniej poprzez wytworzenie stosunkowo grubej warstewki tlenku  $TiO_2$  nad tzw. strefą dyfuzji tlenu. Dzięki ukonstytuowaniu się warstw tlenkowych na powierzchni tytanu i jego stopów można uzyskać znaczną poprawę odporności na korozję biologiczną, biogodności, aktywności biologicznej, topografii powierzchni, a także właściwości mechanicznych i tribologicznych.

Jednym z najbardziej istotnych zagadnień w procesie izotermicznego utleniania tytanu i jego stopów jest dobór optymalnych parametrów obróbki cieplnej, które pozwolą uzyskać warstwy tlenkowe o odpowiedniej grubości, morfologii oraz właściwościach użytkowych. Analiza literatury wykazała, że intensywność procesu utleniania jest często indywidualną cechą danego materiału, co jest szczególnie zauważalne w przypadku stopów tytanu zawierających dodatki stopowe takie jak np. niob. Dobór nieprawidłowych parametrów utleniania może skutkować uzyskaniem warstw tlenkowych o niewielkiej grubości, które nie zapewniają odpowiednich właściwości ochronnych lub też uzyskaniem rozwarstwionych warstw o słabej adhezji, skłonnych do łuszczenia i wykruszania. Jakość uzyskiwanych warstw tlenkowych ma znaczący wpływ na wydłużenie trwałości eksploatacyjnej tytanu i jego stopów w zastosowaniach inżynierskich i biomedycznych. Optymalny dobór warunków utleniania tytanu Grade 2 oraz stopu Ti-6Al-7Nb ma również decydujący wpływ na poprawę odporności na zużycie ściernie, co wykazały wyniki badań zebrane w cyklu monotematycznych artykułów.

Celem prowadzonych badań było poszerzenie istniejącego stanu wiedzy o zjawiskach zachodzących w warstwie wierzchniej tytanu i jego stopów podczas procesu utleniania izotermicznego oraz poszukiwanie nowych związków i zależności pomiędzy strukturą, a właściwościami wytworzonych warstw tlenkowych. Analiza stanu zagadnienia, a także wstępnych wyników badań własnych wykazała zasadność podjęcia próby wytworzenia warstw tlenkowych na tytanie i jego stopach metodą utleniania izotermicznego w celu określenia ich morfologii, składu fazowego, a także właściwości mechanicznych, adhezyjnych i tribologicznych.

**Przyjęto zatem hipotezę badawczą, że zastosowanie metody utleniania izotermicznego prowadzi do znaczącej poprawy charakterystyk mechanicznych, adhezyjnych i tribologicznych, umożliwiając zmniejszenie zużycia ściernego tytanu i jego stopów.**

Doświadczalne potwierdzenie tej hipotezy wymagało ustalenia optymalnych parametrów procesu utleniania, gwarantujących otrzymanie stabilnych i ściśle przylegających warstw tlenkowych do podłoża. Podstawą doboru odpowiednich warunków utleniania były badania kinetyki utleniania wykonane metodą grawimetryczną. Na ich podstawie wytworzono warstwy tlenkowe na powierzchni badanych materiałów tytanowych. Następnie określono morfologię powierzchni, skład fazowy oraz charakterystyki adhezyjne, mechaniczne i tribologiczne otrzymanych warstw tlenkowych.

#### 4.2.2. Omówienie najważniejszych wyników badań

Badania eksperymentalne prowadzono równolegle na tytanie Grade 2 oraz biomedycznym stopie tytanu Ti-6Al-7Nb. Metalograficzne badania mikroskopowe wykazały, że badane materiały różnią się strukturalnie. Tytan Grade 2 charakteryzował się strukturą ziarnistą, o wielkości ziarna według skali ASTM równej 9. Natomiast stop tytanu Ti-6Al-7Nb posiadał strukturę dwufazową ( $\alpha+\beta$ ) z drobnymi wydzieleniami o dużym stopniu rozdrobnienia. Wydzielenia te zawierały dużą ilość niobu, który stabilizuje fazę  $\beta$  w stopach tytanu [H1].

Badania kinetyki utleniania wykonano w temperaturze 500, 600, 700 oraz 800°C metodą grawimetryczną. Określono przyrosty masy na próbkach w zależności od temperatury i czasu utleniania, wartości stałej parabolicznej szybkości utleniania  $K_p$  oraz energię aktywacji. Ponadto wyznaczono wartości współczynnika Pilling-Bedworth dla wszystkich utworzonych tlenków. W badaniach wykazano, że temperatura była najważniejszym parametrem determinującym intensywność procesu utleniania zarówno na tytanie Grade 2 jak i biomedycznym stopie Ti-6Al-7Nb. Większą intensywność procesu utleniania stwierdzono, jednakże na tytanie Grade 2 dla każdego analizowanego wariantu temperaturowo-czasowego.

Po utlenianiu w temperaturze 500°C nie stwierdzono przyrostu masy na badanych materiałach, dlatego ten wariant temperaturowy odrzucono w dalszych badaniach. W początkowym etapie utleniania (do 6 h) w temperaturze 600°C przyrosty masy występowały tylko na próbkach z tytanu Grade 2 [H2]. W przypadku stopu Ti-6Al-7Nb regularne przyrosty masy w tej temperaturze obserwowano dopiero po 24 h utleniania. Mniejsza intensywność utleniania stopu Ti-6Al-7Nb była głównie związana z obecnością niobu w składzie badanego materiału [H3]. Po utlenianiu w temperaturze 700°C przyrosty masy obserwowano w całym przebiegu czasowym procesu utleniania na obydwu materiałach. Podwyższenie temperatury utleniania do 700°C spowodowało niespełna 4-krotny wzrost intensywności utleniania. Jednak w przypadku stopu Ti-6Al-7Nb stwierdzono, że przyrosty masy były o ok. 35% mniejsze w porównaniu do tytanu Grade 2. Największą intensywność procesu utleniania stwierdzono w temperaturze 800°C w szczególności dla tytanu. Podwyższenie temperatury utleniania do 800°C powodowało ok. 10-krotne (o ok. 17,9 mg/cm<sup>2</sup>) zwiększenie przyrostu masy na próbkach z tytanu Grade 2. Natomiast w przypadku stopu Ti-6Al-7Nb uzyskano tylko 2-krotne (o ok. 1,6 mg/cm<sup>2</sup>) zwiększenie przyrostu masy. Porównując intensywność utleniania badanych materiałów w temperaturze 800°C stwierdzono, że tytan Grade 2 charakteryzował się 7-krotnie większym przyrostem masy w porównaniu do stopu Ti-6Al-7Nb [H1].

W kolejnym etapie badań wykazano, że wartości stałej parabolicznej szybkości utleniania  $K_p$  rosły wraz z temperaturą utleniania dla obydwu rodzajów materiałów. Jednocześnie stwierdzono, że tytan Grade 2 charakteryzował się znacznie większymi wartościami stałej  $K_p$ . Następnie wartości stałej  $K_p$  skorelowano z temperaturą utleniania przy wykorzystaniu równania Arrheniusa. Wyznaczono wartość energii aktywacji procesu utleniania tytanu Grade 2, która wyniosła 278,0 kJ/mol [H2], natomiast w przypadku stopu Ti-6Al-7Nb uzyskano energię aktywacji znacząco niższą (170,0 kJ/mol) [H3]. Znacznie wyższa wartość energii aktywacji dla tytanu Grade 2 świadczy o tym, że szybkość reakcji utleniania silniej zależała od temperatury. Ponadto należy wziąć pod uwagę, że przebieg utleniania tytanu i jego stopów jest złożony, ponieważ równoległe z tworzeniem zgorzeli następuje rozpuszczanie się tlenu w metalu, w wyniku którego tworzy się międzywęzłowy roztwór stały tlenu w tytanie. Wyjątkowo duża rozpuszczalność tlenu w czystym tytanie powoduje, że sumaryczna wartość energii aktywacji procesu utleniania tytanu Grade 2 jest wyższa od energii aktywacji utleniania stopu Ti-6Al-7Nb, w którym dodatek niobu zmniejsza rozpuszczalność tlenu ograniczając w ten sposób zakres wewnętrznego utleniania [H1].

Na podstawie wyników badań wstępnych oraz analizy krzywych kinetycznych ustalono optymalne parametry procesu utleniania izotermicznego tytanu Grade 2 oraz stopu Ti-6Al-7Nb. Utlenianie izotermiczne realizowano w temperaturze 600, 700 i 800°C w czasie do 72 h. Dobrane parametry umożliwiły zróżnicowanie morfologii, grubości oraz właściwości użytkowych otrzymanych warstw tlenkowych. Proces utleniania przeprowadzono dla obydwu materiałów w identycznych warunkach, w laboratoryjnym piecu komorowym, w atmosferze powietrza.

Badania morfologii powierzchni na skaningowym mikroskopie elektronowym wykazały, że warstwy tlenkowe wytworzone w procesie utleniania izotermicznego na tytanie Grade 2 oraz stopie Ti-6Al-7Nb charakteryzowały się dobrą jakością, bez śladów wykruszania i łuszczenia. Stwierdzono ponadto zróżnicowaną morfologię powierzchni wytworzonych tlenków w zależności od przyjętych parametrów temperaturowo-czasowych procesu utleniania. Po utlenianiu w temperaturze 600°C otrzymano ciągłą warstwę tlenkową, pokrywającą w całości obserwowaną powierzchnię tylko na tytanie Grade 2. Po utlenianiu w tych samych warunkach, powierzchnia stopu Ti-6Al-7Nb była nierównomiernie pokryta warstwą tlenkową. Proces utleniania realizowany w temperaturze 700°C pozwolił na uzyskanie warstw tlenkowych w całości pokrywających powierzchnię badanych materiałów. Zgorzeli tlenkowe otrzymane w temperaturze 700°C składały się z drobnych, skupionych cząstek tlenków. Jednocześnie stwierdzono, że cząstki tlenków wytworzonych na tytanie Grade 2 były nieco



większe niż na stopie Ti-6Al-7Nb. Ponadto zaobserwowano, że na powierzchni warstwy tlenkowej wytworzonej na stopie Ti-6Al-7Nb w temperaturze 700°C występowały drobne pory. Mogło to być związane z występowaniem luk pomiędzy ziarnami tlenków. Po utlenianiu w temperaturze 800°C, morfologię warstwy tlenkowej zbadano tylko na stopie Ti-6Al-7Nb, ponieważ na tytanie Grade 2 wystąpiły problemy metodyczne ze względu na dużą grubość warstwy tlenkowej. Stwierdzono, że warstwa tlenkowa wytworzona na stopie tytanu charakteryzowała się dobrą jakością mimo wysokiej temperatury utleniania. Jednocześnie zaobserwowano, że tworzące się cząstki tlenków były wyraźnie większe (powierzchnia cząstek tworzących się tlenków była w tym przypadku najbardziej rozwinięta). Duże ziarna tlenków powstawały prawdopodobnie przez łączenie się drobniejszych ziaren [H1].

Skład fazowy wytworzonych warstw tlenkowych określono metodą rentgenowskiej analizy fazowej. Stwierdzono, że podczas utleniania w temperaturze 600 i 700°C, na tytanie Grade 2 tworzyły się tlenki:  $\text{TiO}_2$  (rutyl) oraz  $\text{Ti}_3\text{O}$ . Po utlenianiu w temperaturze 800°C stwierdzono natomiast obecność samego rutylu [H2, H4]. Skład fazowy warstw tlenkowych wytworzonych na stopie Ti-6Al-7Nb był bardziej złożony, co miało ścisły związek z głównymi dodatkami stopowymi takimi jak aluminium oraz niob. Po utlenianiu w temperaturze 600°C stwierdzono obecność tlenku  $\text{TiO}_2$  w dwóch odmianach krystalograficznych (rutyl, anataz). Ponadto w wytworzonej warstwie tlenkowej występowała faza NbO. Analiza fazowa wykazała również obecność pików pochodzących od  $\alpha$ -Ti, co było efektem dyfrakcji promieni rentgenowskich z podłożem. Po utlenianiu w temperaturze 700°C na powierzchni stopu Ti-6Al-7Nb stwierdzono obecność tylko tlenku  $\text{TiO}_2$  (rutyl) oraz pików pochodzących od fazy  $\alpha$ -Ti. W warstwie tlenkowej utworzonej w wyniku utleniania w temperaturze 800°C stwierdzono natomiast występowanie rutylu oraz tlenku  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  [H3]. Następnie wyznaczono współczynnik Pilling-Bedworth dla wszystkich tlenków uzyskanych podczas utleniania tytanu Grade 2 oraz stopu Ti-6Al-7Nb. Otrzymane wartości mieściły się w zakresie 1-2, co oznacza, że wytworzone warstwy tlenkowe były zwarte oraz posiadały odpowiednie właściwości ochronne [H1].

Zróznicowane parametry temperaturowo-czasowe procesu utleniania pozwoliły w szerokim zakresie regulować grubość wytworzonych pokryć tlenkowych na obydwu materiałach. Warstwy tlenkowe wytworzone na tytanie Grade 2 posiadały grubość 1,37  $\mu\text{m}$  oraz 6,01  $\mu\text{m}$ , odpowiednio po utlenianiu w temperaturze 600 i 700°C [H5]. Na stopie Ti-6Al-7Nb po utlenianiu w temperaturze 600°C otrzymano warstwę o znacznie mniejszej grubości (0,22  $\mu\text{m}$ ). Podwyższenie temperatury utleniania do 700°C spowodowało wzrost grubości warstwy do 1,05  $\mu\text{m}$ . Warstwę tlenkową o największej grubości (5,42  $\mu\text{m}$ ) uzyskano

na stopie Ti-6Al-7Nb po utlenianiu w temperaturze 800°C (dla tytanu Grade 2 nie określono grubości warstw tlenkowych otrzymanych w temperaturze 800°C ze względu na problemy metodyczne) [H6]. W badaniach stwierdzono, że warstwy tlenkowe otrzymane na tytanie Grade 2 w temperaturze 600 i 700°C były ok. 6-krotnie grubsze. Otrzymane wyniki potwierdzają znaczny wpływ dodatków stopowych na zmniejszenie intensywności utleniania stopu Ti-6Al-7Nb w porównaniu do tytanu Grade 2.

Badania twardości tytanu Grade 2 oraz stopu Ti-6Al-7Nb w stanie nieutlenionym wykazały, że wyższą twardość posiadał stop tytanu (344,6 HV). Twardość tytanu Grade 2 była znacznie niższa (247,6 HV). Wykazano, że proces utleniania izotermicznego w znaczący sposób zwiększył twardość powierzchniową obydwu badanych materiałów. Po utlenianiu w temperaturze 600°C (przy niższych obciążeniach wgłębnika) wyższą twardość (1261 HV) posiadał tytan Grade 2. Twardość badanego stopu była znacząco niższa i wynosiła 803 HV. Jednocześnie stwierdzono, że wraz z rosnącym obciążeniem wgłębnika występowała coraz mniejsza różnica pomiędzy twardością obydwu materiałów. Wyższa twardość tytanu Grade 2 po utlenianiu w temperaturze 600°C (przy niższych obciążeniach wgłębnika) mogła być związana z większą intensywnością procesu utleniania, co prowadziło do powstania warstwy tlenkowej o większej grubości w porównaniu do stopu Ti-6Al-7Nb. Natomiast przy wyższych wartościach obciążeń wgłębnika to stop Ti-6Al-7Nb charakteryzował się wyższą twardością. Mogło to wynikać z faktu, iż wraz z rosnącym obciążeniem coraz większy wpływ na wynik pomiaru miało podłoże, a mniejszy warstwa tlenkowa. Po utlenianiu w temperaturze 700°C stwierdzono, że większą twardość posiadał tytan Grade 2 (1265 HV). Stop tytanu natomiast charakteryzował się twardością niższą o ok. 15%, szczególnie w zakresie małych obciążeń wgłębnika. Jednocześnie wykazano, że wraz z rosnącym obciążeniem wgłębnika obserwowano łagodniejszy spadek twardości, co miało związek z większą grubością warstw tlenkowych wytworzonych w temperaturze 700°C. Najwyższą twardość (ok. 1300 HV przy obciążeniu 245 mN) obydwu materiałów stwierdzono po utlenianiu w temperaturze 800°C. W badaniach wykazano, że po utlenianiu w tym wariantcie temperaturowym występował najłagodniejszy spadek twardości wraz z rosnącym obciążeniem wgłębnika, co było związane z największą intensywnością procesu utleniania i tym samym grubością warstw tlenkowych otrzymanych w temperaturze 800°C [H1]. Wraz z podwyższeniem temperatury utleniania występował większy rozrzut wyników pomiarów twardości (rosnący błąd pomiaru). Mogło to być spowodowane niejednorodnością mikrostruktury oraz wzrostem chropowatości powierzchni po utlenianiu [H7].

Pomiary twardości przeprowadzono również na przekroju poprzecznym warstw tlenkowych przy wykorzystaniu techniki nanoindentacji. Stwierdzono, że proces utleniania izotermicznego powodował wytworzenie zgorzelin tlenkowych cechujących się wysoką twardością. Twardość warstw tlenkowych (w pobliżu powierzchni zewnętrznej) wytworzonych na tytanie Grade 2 w temperaturze 600°C wynosiła od 4,9 do 9,5 GPa w zależności od czasu utleniania [H5]. W przypadku stopu Ti-6Al-7Nb maksymalna twardość zgorzeliwy była zdecydowanie niższa i wynosiła 5,3 GPa [H6]. Po utlenianiu tytanu w temperaturze 700°C twardość warstw tlenkowych (przy powierzchni zewnętrznej) wynosiła odpowiednio od 9,8 do 13,7 GPa w zależności od czasu utleniania [H5]. Natomiast w przypadku stopu Ti-6Al-7Nb twardość była nieco niższa i wynosiła od 8,9 do 11,3 GPa. Najwyższą twardość (14,2 GPa) uzyskano na próbkach ze stopu Ti-6Al-7Nb utlenionych w temperaturze 800°C w czasie 72 h [H6]. W przypadku obydwu materiałów obserwowano systematyczny spadek twardości wraz z odległością od powierzchni. Jednocześnie stwierdzono, że poniżej warstw tlenkowych występowała strefa o podwyższonej twardości w stosunku do rdzenia próbki, co świadczyło o obecności tzw. dyfuzyjnej strefy przejściowej. Strefa ta charakteryzowała się pośrednią twardością pomiędzy warstwą tlenkową, a rdzeniem. W zależności od przyjętych parametrów temperaturowo-czasowych procesu utleniania obserwowano bardziej gwałtowny lub łagodny spadek twardości, co miało niewątpliwie związek z różną grubością warstw tlenkowych i rosnącym wpływem podłoża.

Badania odporności na zużycie ściernie przeprowadzono na stanowisku tribologicznym typu kula-tarcza. W badaniach stosowano tarcze z tytanu Grade 2 oraz stopu Ti-6Al-7Nb niepokryte oraz pokryte warstwami tlenkowymi. W charakterze przeciwpórek stosowano kulki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o średnicy 10 mm. Określono współczynnik tarcia oraz zużycie liniowe i objętościowe badanego węzła tribologicznego. Wykazano, że tytan Grade 2 w stanie nieutlenionym cechował się nieco wyższą wartością współczynnika tarcia (0,58) w porównaniu do stopu Ti-6Al-7Nb (0,49) [H8, H9]. Ponadto w przypadku stopu Ti-6Al-7Nb stwierdzono, że amplituda współczynnika tarcia charakteryzowała się nieco szerszym zakresem. Wykazano, że wytworzenie na powierzchni tytanu Grade 2 oraz stopu Ti-6Al-7Nb warstw tlenkowych, metodą utleniania izotermicznego, prowadziło do podwyższenia wartości współczynnika tarcia szczególnie w początkowym etapie testów tribologicznych (do wartości ok. 0,7-0,8). Jest to niezgodne z niektórymi danymi literaturowymi, w których obserwowano, że zgorzeliwy tlenkowe zmniejszają wartość oraz amplitudę współczynnika tarcia.

Badania charakterystyk tribologicznych tytanu Grade 2 oraz stopu Ti-6Al-7Nb w stanie nieutlenionym i utlenionym pozwoliły na wyznaczenie parametrów zużycia liniowego

i objętościowego. Na podstawie analizy wyników zużycia liniowego, obejmującego sumaryczne zużycie współpracującej pary trącej stwierdzono, że większa intensywność zużycia występowała w skojarzeniu tribologicznym Ti-6Al-7Nb—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (zarówno dla stopu w stanie nieutlenionym jak i utlenionym). Wykazano, że zużycie liniowe pary ciernej tytan—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> w stanie nieutlenionym oraz po utlenianiu w temperaturze 600°C było niższe od 38 do 47% [H8, H9]. Jednocześnie stwierdzono, że wraz ze wzrostem temperatury utleniania rosła odporność na zużycie ściernie badanych par trących. Najmniejszą wartość zużycia liniowego otrzymano podczas współpracy tribologicznej stopu Ti-6Al-7Nb poddanego utlenianiu w temperaturze 800°C z kulkami Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (tytanu Grade 2 nie utleniano w temperaturze 800°C) [H9]. Nieco inne charakterystyki tribologiczne otrzymano dla parametru zużycia objętościowego. Stwierdzono, że tytan Grade 2 w stanie nieutlenionym zużywał się intensywniej w porównaniu do stopu Ti-6Al-7Nb. Wykazano tym samym, że obecność dodatków stopowych korzystnie wpływa na wzrost odporności na zużycie ściernie badanego stopu. Po utlenianiu w temperaturze 600°C zaobserwowano istotny spadek zużycia objętościowego tylko dla tytanu Grade 2 (o 47 % w porównaniu do powierzchni nieutlenionej) [H10]. Natomiast w przypadku stopu Ti-6Al-7Nb zużycie objętościowe było porównywalne z wartością otrzymaną na powierzchni nieutlenionej, co oznacza, że warstwa tlenkowa nie posiadała odpowiedniej grubości do zastosowań tribologicznych. Powierzchniowe warstwy tlenkowe otrzymane w temperaturze 700°C pozwoliły ograniczyć zużycie ściernie badanych materiałów w jeszcze większym stopniu, choć ich skuteczność w ochronie tribologicznej była większa na tytanie Grade 2 (ponad dwukrotne zmniejszenie zużycia objętościowego w porównaniu do powierzchni nieutlenionej). Najlepszą odpornością na zużycie ściernie charakteryzowała się jednak warstwa tlenkowa otrzymana na stopie Ti-6Al-7Nb w temperaturze 800°C (tytanu Grade 2 nie utleniano w temperaturze 800°C). W tym przypadku zaobserwowano blisko 6-krotną redukcję zużycia objętościowego, co było ściśle związane z grubością warstwy tlenkowej (5,42 μm) [H9]. W badaniach wykazano, że obecność zgorzelin tlenkowych na powierzchni tytanu Grade 2 oraz stopu Ti-6Al-7Nb miała również korzystny wpływ na redukcję zużycia objętościowego kulek Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> stosowanych jako przeciwpróbki. Podczas współpracy tribologicznej z warstwami tlenkowymi uzyskani w temperaturze 700 i 800°C redukcja zużycia objętościowego kulek wynosiła nawet ponad 90%.

W ramach badań określono również wskaźnik mikromechanizmu zużycia ściernego  $\beta$  dla tytanu Grade 2 oraz stopu Ti-6Al-7Nb w stanie nieutlenionym oraz po utlenianiu. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że wskaźnik ten był bliski jedności niezależnie od materiału oraz zastosowanych parametrów utleniania izotermicznego. Oznacza to, że

dominującym mikromechanizmem zużycia było skrawanie. Potwierdzeniem tego były obserwacje mikroskopowe śladów zużycia przeprowadzone na skaningowym mikroskopie elektronowym [H1].

Badania struktury geometrycznej śladów zużycia przeprowadzono przy wykorzystaniu profilografometru stykowego 3D. Analiza otrzymanych obrazów izometrycznych prowadzi do wniosku, że ślady zużycia utworzone na powierzchni nieutlenionej cechowały się największą szerokością oraz powierzchnią przekroju poprzecznego zarówno na tytanie Grade 2 jak i stopie Ti-6Al-7Nb [H9, H10]. Ponadto w badaniach stwierdzono tendencję do tworzenia się zjawiska zużycia falistego na nieutlenionym tytanie Grade 2, charakteryzującego się wystąpieniem na powierzchni tarcia naprzemianległych obszarów o kształcie elipsoidalnym. Na podstawie analizy obrazów izometrycznych 3D stwierdzono, że największe zagłębienia tworzyły się w środkowej części tych obszarów i to właśnie w tych miejscach gromadziły się liczne produkty zużycia [H10]. Jednocześnie stwierdzono, że obecność warstw tlenkowych na powierzchni tytanu Grade 2 otrzymanych w procesie utleniania izotermicznego skutecznie eliminuje zjawisko zużycia falistego, co jest wynikiem nowym i nieopisywanym dotąd w literaturze. Wykazano, że wraz ze wzrostem temperatury utleniania, pole przekroju poprzecznego śladów zużycia ulegało wyraźnemu zmniejszeniu i tym samym powstałe ślady zużycia odznaczały się mniejszą szerokością oraz głębokością na obydwu materiałach.

Badania przyczepności warstw tlenkowych do materiału podłoża przeprowadzono przy pomocy próby zarysowania (scratch-test). W badaniach wykazano, że dobrane parametry procesu utleniania zapewniały wytworzenie warstw tlenkowych dobrej jakości i o wymaganych właściwościach adhezyjnych. Stwierdzono, że otrzymane warstwy cechowały się zróżnicowaną odpornością na zarysowanie zależną od parametrów procesu utleniania. Wykazano, że zarówno w przypadku tytanu jak i stopu Ti-6Al-7Nb odporność na zarysowanie rosła wraz ze wzrostem temperatury utleniania. Najniższą odpornością na zarysowanie charakteryzowały się warstwy tlenkowe wytworzone w temperaturze 600°C. Obciążenia krytyczne odpowiadające całkowitej delaminacji warstwy wynosiły odpowiednio 75 N w przypadku tytanu Grade 2 oraz 65,9 N dla stopu Ti-6Al-7Nb [H11, H12]. Zgorzelina tlenkowa otrzymana na powierzchni tytanu Grade 2 cechowała się wyższą odpornością na zarysowanie, co mogło być związane z większą grubością wytworzonych pokryw oraz ich składem fazowym, twardością, a także strukturą dyfuzyjnej strefy przejściowej. Z kolei stop tytanu Ti-6Al-7Nb wykazywał wyższą odporność na utlenianie, co przekładało się bezpośrednio na gorszą przyczepność zgorzeli. Podwyższenie temperatury utleniania do 700°C skutkowało wzrostem odporności na zarysowanie, co było szczególnie zauważalne

w przypadku czystego tytanu. Najlepszą odpornością na zarysowanie cechowały się warstwy tlenkowe na tytanie Grade 2 po utlenianiu w temperaturze 700°C (72 h) oraz 800°C (2 i 6 h). Wartość obciążenia krytycznego dla powyższych wariantów utleniania wynosiła ponad 80 N [H12]. W badaniach przeprowadzonych na stopie Ti-6Al-7Nb wykazano ponadto związek pomiędzy parametrami temperaturowo-czasowymi procesu utleniania, przyczepnością warstw tlenkowych a odpornością na zużycie ściernie. Stwierdzono, że największą odpornością na zużycie ściernie charakteryzowała się warstwa tlenkowa o najlepszej przyczepności (uzyskana po utlenianiu w temperaturze 700°C) [H7].

W ramach prowadzonych prac badawczych podjęto również próbę otrzymania warstw tlenkowych na tytanie Grade 2 oraz stopie Ti-6Al-7Nb metodą utleniania cyklicznego. Proces utleniania cyklicznego tytanu Grade 2 realizowano w temperaturze 600, 650 oraz 700°C. Natomiast stop Ti-6Al-7Nb utleniano cyklicznie w temperaturze 600, 700 i 800°C. Parametry procesu dobrano uwzględniając różnice w intensywności utleniania badanych materiałów. Proces utleniania cyklicznego realizowano w 12 cyklach. Czas wygrzewania dla 1 cyklu wynosił 6 h, a łączny czas utleniania 72 h (czas utleniania był identyczny jak w przypadku utleniania izotermicznego). Stwierdzono, że wytworzone w ten sposób warstwy tlenkowe charakteryzowały się dobrą jakością, a w zależności od temperatury utleniania i liczby cykli różniły się morfologią powierzchni (jedynie w przypadku najwyższych temperatur utleniania wystąpiły problemy z jakością otrzymanych warstw tlenkowych). W badaniach kinetyki utleniania cyklicznego wykazano, że na intensywność przyrostu masy większy wpływ miała temperatura niż liczba cykli. Największą intensywność procesu utleniania tytanu Grade 2 stwierdzono w temperaturze 700°C. Z kolei stop Ti-6Al-7Nb najintensywniej utleniał się w temperaturze 800°C. Proces utleniania stopu Ti-6Al-7Nb przerwano jednak po 4 cyklu (po 24 h) ze względu na pogarszającą się jakość warstwy tlenkowej. Podobnego zjawiska nie zaobserwowano podczas utleniania izotermicznego. Stwierdzono, że proces utleniania cyklicznego przyczynił się do uzyskania większych wartości stałej parabolicznej szybkości utleniania  $K_p$  w porównaniu do metody utleniania izotermicznego. Energia aktywacji procesu utleniania cyklicznego tytanu Grade 2 wynosiła 205,3 kJ/mol i była niższa w porównaniu do utleniania izotermicznego (278,0 kJ/mol). Należy jednak podkreślić, że obliczenia energii aktywacji procesu utleniania izotermicznego i cyklicznego prowadzono w innych przedziałach temperaturowych. Z kolei energia aktywacji procesu utleniania cyklicznego stopu Ti-6Al-7Nb (175,4 kJ/mol) była nieznacznie wyższa w porównaniu do metody utleniania izotermicznego (170,0 kJ/mol). W badaniach wykazano ponadto, że proces utleniania cyklicznego pozwolił na otrzymanie warstw tlenkowych o większej grubości. Po utlenianiu cyklicznym tytanu Grade 2

w temperaturze 600°C (12 cykli) otrzymano warstwę tlenkową o grubości 2,12 µm (grubość warstwy tlenkowej była większa o ok. 0,75 µm w porównaniu do utleniania izotermicznego). Po 12 cyklach utleniania w temperaturze 700°C otrzymano warstwę tlenkową o kilkukrotnie większej grubości wynoszącej 9,45 µm (o ok. 57% większa grubość zgorzeliny w porównaniu do metody utleniania izotermicznego). Natomiast po utlenianiu cyklicznym stopu Ti-6Al-7Nb (12 cykli) w temperaturze 600°C otrzymano warstwę tlenkową o 2-krotnie większej grubości (0,44 µm), a w temperaturze 700°C grubość wytworzonej warstwy była większa o ok. 55% (1,63 µm) w porównaniu do utleniania izotermicznego. Badania składu fazowego po utlenianiu cyklicznym tytanu Grade 2 wykazały obecność w wytworzonych warstwach tylko tlenku TiO<sub>2</sub> w odmianie krystalograficznej rutylu niezależnie od temperatury utleniania. Jednocześnie stwierdzono obecność pików pochodzących od α-Ti (z podłoża). Skład fazowy warstw tlenkowych wytworzonych na stopie Ti-6Al-7Nb był bardziej złożony. Po utlenianiu w temperaturze 600 i 700°C wykazano obecność trzech faz: α-Ti, TiO<sub>2</sub> (rutyl) oraz Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Tlenek Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miał tendencję do tworzenia się w pobliżu podłoża, natomiast rutyl obserwowano głównie w części zewnętrznej warstwy [H13, H14].

#### 4.2.3. Podsumowanie

Podstawowy kierunek działalności naukowo-badawczej koncentrował się na zagadnieniach poprawy trwałości eksploatacyjnej tytanu i jego stopów o charakterze wielofunkcyjnym, obejmującym charakterystyki strukturalne, mechaniczne, adhezyjne i tribologiczne. Uzyskane wyniki badań naukowych wykazały w pełni celowość utleniania izotermicznego jako metody modyfikacji warstwy wierzchniej tych materiałów. Tematyka badań posiada interdyscyplinarny charakter naukowy, istotny szczególnie z punktu widzenia inżynierii materiałowej oraz nauk biomedycznych.

Zasadność podjęcia wybranego tematu badawczego wynikała z przesłanek inżynierskich i medycznych oraz szerokiej analizy literatury dotyczącej problematyki trwałości eksploatacyjnej tytanu i jego stopów. Materiały te cechują się słabymi właściwościami tribologicznymi, ale jednocześnie skłonnością do intensywnego utleniania w temperaturze powyżej 500°C, co można pozytywnie wykorzystać w celu poprawy właściwości użytkowych. Celem badań było poszerzenie istniejącego stanu wiedzy o zjawiskach zachodzących podczas utleniania tytanu i jego stopów oraz poszukiwanie nowych związków i zależności pomiędzy strukturą, a właściwościami wytworzonych warstw tlenkowych. Wytworzenie warstw tlenkowych na tytanie i jego stopach o określonej morfologii i składzie fazowym, kontrolowanej topografii powierzchni oraz zwiększonej odporności na zużycie ścierne było

wysoce istotne zarówno pod względem poznawczym jak i utylitarnym. Uzyskane wyniki badań przyczynią się do zwiększenia trwałości zarówno elementów konstrukcyjnych stosowanych w technice jak i biomateriałów używanych na implanty w medycynie.

W badaniach wykazano, że metodą utleniania izotermicznego otrzymywać można warstwy tlenkowe na tytanie Grade 2 oraz biomedycznym stopie Ti-6Al-7Nb, cechujące się zróżnicowaną grubością, twardością i morfologią powierzchni. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem temperatury utleniania izotermicznego następuje zwiększenie ciągłości pokrycia, a tworzące się cząstki tlenków charakteryzowały się bardziej rozwiniętą powierzchnią. Uzyskano kilkukrotne zwiększenie twardości warstwy wierzchniej, co skutkowało znaczną poprawą charakterystyk tribologicznych. Wykazano, że poprzez wytworzenie warstw tlenkowych na tytanie Grade 2 oraz stopie Ti-6Al-7Nb w procesie utleniania izotermicznego można uzyskać znaczną redukcję zużycia liniowego (pary trącej) i objętościowego. Warstwy tlenkowe utworzone na badanych materiałach pozwoliły zredukować zużycie ściernie nawet ponad 80%. W badaniach wykazano istnienie związku pomiędzy adhezją, a właściwościami tribologicznymi otrzymanych warstw tlenkowych. Stwierdzono, że warstwy o najlepszej adhezji jednocześnie charakteryzowały się najlepszą odpornością na zużycie ściernie. Na podstawie analizy izometrycznych obrazów 3D powierzchni tarcia, stwierdzono, że obecność warstw tlenkowych na tytanie Grade 2 oraz stopie Ti-6Al-7Nb miała znaczący wpływ na wielkość i charakter śladów zużycia. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem temperatury utleniania ślady zużycia miały mniejszą powierzchnię przekroju poprzecznego oraz cechowały się występowaniem łagodniejszych rys na powierzchni tarcia. Należy wskazać, że w wyniku przeprowadzonych prac badawczych, po raz pierwszy w literaturze wykazano, że warstwy tlenkowe obecne na powierzchni tytanu Grade 2 oraz stopu Ti-6Al-7Nb skutecznie eliminują niekorzystne zjawisko zużycia falistego. Stanowi to znaczne osiągnięcie w zakresie inżynierii materiałowej.

## **5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej**

### **Przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora**

W 1998 roku rozpocząłem studia magisterskie na Politechnice Śląskiej na ówczesnym Wydziale Inżynierii Materiałowej, Metalurgii i Transportu, na kierunku: Inżynieria Materiałowa. Studia ukończyłem w 2003 roku broniąc pracę magisterską pt. „Technologia



wytwarzania powłok zanurzeniowych w kąpielach 55% Al-Zn” wykonaną pod kierunkiem dr. inż. Jacka Mendali. Celem pracy było określenie wpływu szybkości chłodzenia na budowę i grubość wytworzonych powłok cynkowo-aluminiowych. W czasie wykonywania pracy magisterskiej zdobyłem doświadczenie z zakresu doboru składu kąpeli do metalizacji, procesu przygotowania powierzchni, opracowania parametrów technologicznych procesu wytwarzania oraz budowy otrzymanych powłok.

Po ukończeniu studiów magisterskich rozpocząłem w 2005 roku studia doktoranckie na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej z zakresu „budowy i eksploatacji maszyn”. W tym samym roku rozpocząłem badania do pracy doktorskiej. Prace eksperymentalne prowadziłem na Wydziale Transportu oraz Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej. W trakcie badań koncentrowałem się głównie nad kształtowaniem morfologii perlitu w stali wysokowęglowej R260 w procesie wyżarzania izotermicznego. Tematyka pracy miała interdyscyplinarny charakter naukowy obejmujący zagadnienia z zakresu inżynierii materiałowej, transportu szynowego, a także modelowania numerycznego przy wykorzystaniu metody elementów skończonych.

W ramach realizacji pracy doktorskiej otrzymałem grant promotorski pt. „Wpływ morfologii perlitu na odporność na zużycie ścierne kształowników klockowych stosowanych w rozjazdach kolejowych” nr NN 507446333. Projekt został zakończony w 2009 roku [Zał. 4, pkt II.9].

W badaniach określiłem temperatury przemian fazowych  $A_{c1}$  i  $A_{c3}$  podczas nagrzewania oraz temperatury  $A_{r3}$  i  $A_{r1}$  podczas chłodzenia stali R260. Na tej podstawie dobrałem parametry procesu wyżarzania izotermicznego. Następnie określiłem związki pomiędzy strukturą materiału, a w szczególności morfologią perlitu i czynnikami eksploatacyjnymi takimi jak obciążenie i poślizg, co w konsekwencji pozwoliło lepiej prognozować zużycie krzyżownic rozjazdów kolejowych (kształowników klockowych) w warunkach tarcia toczno-ślizgowego. Ponieważ temat pracy był ściśle związany z tematyką rozjazdów kolejowych, wyznaczyłem również rozkłady obciążenia dynamicznego podczas przejazdu pojazdu szynowego przez rozjazd zwyczajny metodą numeryczną, przy wykorzystaniu programu Universal Mechanism. Ponadto wykonałem badania numeryczne rozkładu naprężeń kontaktowych w systemie koło-rozjazd przy wykorzystaniu programu MSC Marc bazującego na metodzie elementów skończonych.

Uzyskane wyniki stały się podstawą do opracowania rozprawy doktorskiej pt. „Wpływ morfologii perlitu w stali na odporność na zużycie ścierne kształowników klockowych stosowanych w rozjazdach kolejowych”. Promotorem pracy był dr hab. inż. Jerzy Herian, prof.

PŚ. Stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa uzyskałem 17 listopada 2009 roku na podstawie uchwały Rady Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej. Moim głównym osiągnięciem było opracowanie wytycznych do ustalenia warunków i technologii wytwarzania kształowników klockowych o określonej strukturze perlitycznej i właściwościach, gwarantujących zwiększoną odporność na ścieranie w warunkach występujących w eksploatacji rozjazdów kolejowych.

Zdobytą wiedzę wykorzystałem przy współpracy z innymi ośrodkami naukowymi, w zakresie:

- badań dylatometrycznych mających na celu określenie temperatury przemian fazowych przy nagrzewaniu i chłodzeniu stali,
- kształtowania morfologii perlitu w stali,
- pomiarów cech morfologicznych perlitu,
- modelowania numerycznego rozkładu naprężeń kontaktowych,
- modelowania numerycznego zjawisk dynamicznych podczas przejazdu pojazdu szynowego przez tor i rozjazd kolejowy,
- badań parametrów geometrycznych torów kolejowych,
- pomiarów zużycia kształowników szynowych w warunkach eksploatacyjnych.

W okresie realizacji pracy doktorskiej obok realizacji projektu promotorskiego brałem udział w licznych szkoleniach oraz pracach badawczych i ekspertyzach dla przemysłu prowadzonych w Katedrze Transportu Szynowego Politechniki Śląskiej [Zał. 4, pkt III.5].

Najważniejsze osiągnięcia z działań naukowo-badawczych przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora zostały opublikowane w 12 publikacjach naukowych. Uzyskane wyniki badań zaprezentowałem w formie 5 referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych w zakresie nauki o materiałach [Zał. 4, pkt II.7].

### **Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora**

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych zostałem zatrudniony w Instytucie Nauki o Materiałach na Wydziale Informatyki i Nauki o Materiałach Uniwersytetu Śląskiego, gdzie od 2010 roku do dzisiaj pracuję na stanowisku adiunkta. Początkowo pracowałem w Zakładzie Polimerów i Technologii Materiałów, a następnie w Zakładzie Technologii Materiałów Inżynierskich. W początkowym okresie po uzyskaniu stopnia doktora odbyłem staż w Katedrze Technologii Materiałów Politechniki Śląskiej mający na celu zapoznanie z technologią prowadzenia wytopów metali i stopów w piecu indukcyjnym próżniowym. Program stażu obejmował następujące zagadnienia: budowę i działanie pieca indukcyjnego,

techniki wytapiania metali i stopów w piecach indukcyjnych, rodzaje tygli do topienia i form odlewniczych oraz ich dobór, przygotowanie materiałów wsadowych do wytopu, obliczanie udziałów wagowych składników wsadu w zależności od składu chemicznego wytopu, dobór temperatury wytapiania i odlewania, prowadzenie wytopu w próżni i w atmosferze ochronnej, pomiar temperatury ciekłego metalu, kontrolę składu stopu podczas wytapiania, sposoby zalewania form ciekłym metalem oraz kształtowanie struktury pierwotnej metali i stopów [Zał. 4, pkt II.11]. Następnie kontynuowałem prace badawcze związane kształtowaniem morfologii perlitu w stalach wysokowęglowych pod kątem uzyskania korzystnych charakterystyk mechanicznych i tribologicznych. Wraz z zespołem naukowców z Politechniki Śląskiej brałem udział jako główny wykonawca grantu PBU-70/RM2/2011 pt. „Oddziaływanie struktury na właściwości stali węglowo-manganowej w rozjazdach kolejowych odpornych na zużycie ścierne i zmęczeniowe” [Zał. 4, pkt II.9]. W ramach realizacji ww. projektu określiłem parametry morfologiczne perlitu dla różnych wariantów procesu wyżarzania izotermicznego [Zał. 4, pkt II.4.1, poz. 10]. Ponadto zbudowałem model rozjazdu i wyznaczyłem obciążenia podczas przejazdu pojazdu szynowego przez rozjazd zwyczajny i krzyżowy metodą numeryczną. Na podstawie wyników modelowania numerycznego dobrałem wartości poślizgu i nacisków Hertza w badaniach tribologicznych. Badania mające na celu określenie wpływu morfologii perlitu na zużycie ścierne stali w warunkach tarcia toczno-ślizgowego wykonałem na stanowisku Amslera. Następnie opracowałem zależności zmiany wielkości zużycia ściernego w funkcji parametrów opisujących morfologię perlitu oraz czynników eksploatacyjnych. W ramach prowadzonych prac badawczych wykonałem również badania numeryczne rozkładu naprężeń kontaktowych i zredukowanych w systemie koło-rozjazd przy wykorzystaniu metody elementów skończonych. Uczestniczyłem również jako wykonawca w realizacji projektu badawczo-wdrożeniowego INNOTECH-K1/IN1/46/157239/NCBR/12 realizowanego przez konsorcjum: Uniwersytet Śląski, Politechnika Warszawska, MIKROHUTA oraz BPH "MIKROMED" Sp. z o.o. w Dąbrowie Górniczej [Zał. 4, pkt II.15]. Celem projektu było wprowadzenie na rynek polski produkcji stopów NiTi z pamięcią kształtu oraz przygotowanie wdrożenia prototypowych implantów z tych stopów do konkretnych zastosowań biomedycznych.

Równoległe z badaniami prowadzonymi w ramach grantów wykonywałem również pomiary zużycia ściernego krzyżownic podwójnych rozjazdów krzyżowych w warunkach eksploatacyjnych oraz uczestniczyłem w badaniach związanych z określeniem wpływu stopnia przerobu wlewka ciągłego na jednorodność własności prętów walcowanych na gorąco. Ponadto we współpracy z Wydziałem Transportu Politechniki Śląskiej opracowałem metodykę

i sposoby weryfikacji obliczeń naprężeń kontaktowych w systemie koło-szyna, które są czynnikami decydującymi o trwałości i bezpieczeństwie transportu kolejowego. W ramach realizowanych prac badawczych skupiłem się na problemach dotyczących teorii Hertza, której stosowanie jest ograniczone tylko do odkształceń sprężystych materiału. W celu rozwiązania tego problemu zaproponowano wykorzystanie metody elementów skończonych, która pozwala wyeliminować ograniczenia teorii Hertza i przyjąć w obliczeniach materiał o charakterystyce sprężysto-plastycznej. Następnie oszacowano błędy obliczeń numerycznych w programie MSC MARC oraz wykonano płaskie i przestrzenne modele testowe. W kolejnych etapach prac porównane zostały także wyniki obliczeń numerycznych z obliczeniami analitycznymi. Na podstawie otrzymanych wyników określono wpływ parametrów siatki elementów skończonych na błąd obliczeń naprężeń kontaktowych oraz dobrano odpowiednie parametry siatki tak, aby błąd obliczeń numerycznych był najmniejszy. Następnie określono wpływ charakterystyki materiału na wielkość naprężeń kontaktowych występujących na styku koła i szyny [Zał. 4, pkt II.4.1, poz. 11]. W ramach współpracy z Wydziałem Transportu Politechniki Śląskiej prowadziłem również badania w zakresie numerycznego modelowania rozkładu naprężeń kontaktowych oraz fizycznego modelowania zużycia ściernego w systemie koło-krzyżownica tramwajowa. Efektem tej współpracy była publikacja w renomowanym czasopiśmie *Wear* (2015) za 35 punktów (wg listy MNiSW w roku opublikowania artykułu) [Zał. 4, pkt II.4.1, poz. 9]. Moja dalsza współpraca z Wydziałem Transportu i Inżynierii Lotniczej (aktualna nazwa wydziału) Politechniki Śląskiej skupiała się na zagadnieniach związanych z modyfikacją powierzchni zderzaków kolejowych. Podstawowym celem tych badań było zwiększenie trwałości eksploatacyjnej zderzaków kolejowych poprzez pokrycie ich powierzchni powłokami z brązu aluminiowego i manganowego metodą napawania laserowego. Zastosowana nowatorska metoda pozwoliła na całkowite wyeliminowanie tradycyjnego sposobu pokrywania powierzchni zderzaków smarem grafitowym, które to posiada wiele istotnych wad. W badaniach wykazano, że zastosowanie powłoki z brązu aluminiowego pozwala na znaczące zmniejszenie zużycia ściernego w stosunku do powierzchni niepokrytej powłoką (zużycie mniejsze średnio o ok. 89,36 %). Wartości te pozwalają na założenie, że obecnie stosowana metoda zabezpieczania tarcz zderzaków przed zużyciem ściernym może zostać zastąpiona nową, pozbawioną wad obecnej. Efekty współpracy z Politechniką Śląską zostały docenione przez międzynarodowe grono ekspertów poprzez opublikowanie uzyskanych rezultatów w renomowanym czasopiśmie naukowym *Wear* (2020) za 200 pkt (wg listy MNiSW w roku opublikowania artykułu) [Zał. 4, pkt II.4.1, poz. 1].

W ramach prac badawczych prowadzonych w macierzystej jednostce, uczestniczyłem również w badaniach nad ograniczeniem kruchości środowiskowej aluminidków żelaza. Badania te związane były z ograniczeniem oddziaływania wodoru, który inicjuje kruche pękanie i tym samym przedwczesne niszczenie intermetali. Brałem udział w wytwarzaniu i badaniach ochronnej warstewki opartej o tlenki aluminium na powierzchni stopu FeAl, która skutecznie przyczyniła się do zmniejszenia efektu kruchości środowiskowej i poprawiła tym samym właściwości plastyczne badanego stopu [Zał. 4, pkt II.4.1, poz. 7]. Ponadto aktywnie uczestniczyłem w dwóch innych projektach badawczych naszego zespołu. Jeden dotyczył opracowania skutecznej metody kształtowania struktury i własności stopów magnezu Mg-Y-Nd-Zr z myślą o zastosowaniach biomedycznych, a drugi poprawy trwałości eksploatacyjnej politetrafluoroetylenu oraz jego kompozytów poprzez zmianę budowy wywołanej napromieniowaniem strumieniem elektronów. W badaniach eksperymentalnych określono zmiany mikrostruktury, właściwości mechanicznych i tribologicznych zachodzące w wyniku utwardzania wydzieleniowego stopów magnezu. Wykazano, że zarówno temperatura zastosowanego chłodziwa podczas przesycania jak i czas starzenia wpływały w znaczący sposób na właściwości mechaniczne badanego stopu magnezu. Ponadto stwierdzono, że zmiany właściwości mechanicznych w wyniku starzenia stopu wpłynęły korzystnie na poprawę właściwości tribologicznych [Zał. 4, pkt II.4.1, poz. 5]. Drugi z realizowanych projektów badawczych dotyczył określenia wpływu napromieniowania strumieniem elektronów na właściwości termiczne, mechaniczne i tribologiczne politetrafluoroetylenu oraz jego kompozytów. W badaniach eksperymentalnych wykazano, że zmiana budowy polimeru wywołana przez zaabsorbowaną dawkę strumienia elektronów spowodowała liniowy, proporcjonalny do pochłoniętej dawki napromieniowania wzrost twardości, co skutkowało znacznym ograniczeniem zużycia liniowego [Zał. 4, pkt II.4.1, poz. 2, 3, 6].

W pracy naukowej po doktoracie uczestniczyłem również w badaniach z zakresu historii i archeologii we współpracy z Uniwersytetem Humanistyczno-Przyrodniczym im. Jana Długosza w Częstochowie, a w szczególności w badaniach nałoknicy z końca XIV i początku XV wieku, znalezionej na Zamku w Ogrodzieńcu [Zał. 4, pkt II.4.1, poz. 4]. Współpracowałem również z innymi jednostkami naukowymi takimi jak: Politechnika Częstochowska, Politechnika Rzeszowska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Instytut Metalurgii Żelaza.

Moją główną tematyką badawczą realizowaną po uzyskaniu stopnia naukowego doktora było kształtowanie struktury i właściwości warstw tlenkowych na tytanie Grade 2 oraz biomedycznym stopie Ti-6Al-7Nb w procesie utleniania izotermicznego. Realizacja badań w tym zakresie była możliwa dzięki dotacji dla młodych naukowców, w której dwukrotnie

byłem kierownikiem projektu [Zał. 4, pkt II.9]. W ramach prowadzonych prac badawczych złożyłem w 2014 roku do Narodowego Centrum Nauki projekt w konkursie Sonata 7 zatytułowany „Modyfikacja warstwy wierzchniej tytanu i jego stopów w procesach utleniania”. Niestety wniosek nie otrzymał finansowania.

W wyniku prowadzonych przeze mnie prac eksperymentalnych uzyskano na badanych materiałach warstwy tlenkowe o optymalnych właściwościach mechanicznych, adhezyjnych i tribologicznych, które w znaczącym stopniu pozwoliły na ograniczenie procesów destrukcyjnych warstwy wierzchniej tytanu i jego stopów. Wytworzone w procesie utleniania warstwy wierzchnie charakteryzowały się wysoką twardością oraz odpornością na zużycie ściernie i tym samym przewyższały pod względem właściwości użytkowych inne powłoki. Z powyższej tematyki badawczej opublikowałem cykl 14. monotematycznych publikacji zamieszczonych w czasopiśmie o sumarycznym IF=33,263.

Podczas pracy na Uniwersytecie Śląskim brałem czynny udział w realizacji 9 projektów prowadzonych w Instytucie Nauki o Materiałach (obecnie Instytut Inżynierii Materiałowej) w ramach Badań Statutowych. Od 2020 roku jestem wykonawcą w projekcie „Modyfikacja struktury i właściwości tytanu oraz stopów tytanu i magnezu dla potrzeb konstrukcyjnych i medycznych” realizowanym w Instytucie Inżynierii Materiałowej [Zał. 4, pkt II.9]. Wyniki moich prac badawczych zostały zaprezentowane w postaci 19 referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych, w tym 5 referatów wygłosiłem przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora [Zał. 4, pkt II.7]. Prowadziłem również obrady konferencyjne jako przewodniczący sesji na konferencjach „Forming 2011” oraz „Jesienna Szkoła Tribologiczna 2017”. Natomiast na konferencji naukowej „Jesienna Szkoła Tribologiczna 2019” byłem przewodniczącym sesji plenarnej. W wyniku oceny dorobku naukowego w roku 2012 i 2017 otrzymałem nagrodę indywidualną i zespołową JM Rektora Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach za działalność naukowo-badawczą i organizacyjną.

Zdobyte doświadczenie w prowadzeniu badań własnych oraz opracowaniu publikacji naukowych uzyskało uznanie gremium międzynarodowego, które w latach 2016-2020 powierzyło mi recenzowanie publikacji naukowych w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym i krajowym. Wykonałem łącznie 17 recenzji publikacji. Zdecydowana większość czasopism naukowych posiadała współczynnik wpływu IF i znajdowała się tym samym w bazie JCR [Zał. 4, pkt II.13].

Efektom mojej dotychczasowej działalności naukowo-badawczej jest 69 oryginalnych publikacji naukowych [Zał. 4, pkt II.4], w tym 12 prac opublikowanych przed uzyskaniem stopnia doktora. Sumaryczny wskaźnik IF moich publikacji wynosi 60,437 wg listy JCR

(zgodnie z rokiem opublikowania), a sumaryczny 5-letni IF wg listy JCR wynosi 61,514, co stanowi 2046 punktów w ocenie parametrycznej według danych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego [Zał. 4, pkt IV].

Liczba cytowań\* moich publikacji na dzień 03.12.2020 wynosi: 175 (134) wg bazy Web of Science Core Collection, 211 (167) wg bazy Scopus i 328 (249) wg bazy Google Scholar. Suma cytowań wg baz Web of Science Core Collection i Scopus wynosi 219 (173). Mój Indeks Hirscha (bez autocytowań) na dzień 03.12.2020 wynosi: 6 wg bazy Web of Science Core Collection, 7 wg bazy Scopus oraz 8 wg bazy Google Scholar [Zał. 8].

\*wartości w nawiasach przedstawiają cytowania z wyłączeniem autocytowań

## **6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę**

### Działalność dydaktyczna

W początkowym etapie pracy naukowej jako doktorant, prowadziłem zajęcia laboratoryjne na Wydziale Transportu Politechniki Śląskiej, na kierunku Transport z przedmiotów: Badania pojazdów, Diagnostyka pojazdów szynowych i Logistyka. Zajęcia ze studentami stale uzupełniałem o najnowsze osiągnięcia, metody badawcze oraz wyniki własnych badań. Oprócz zajęć dydaktycznych prowadziłem również szkolenia dla studentów z zakresu zaawansowanych technik projektowania i weryfikacji konstrukcji w systemie Catia. Ponadto prowadziłem kursy dla studentów z zakresu Europejskiego Certyfikatu Umiejętności Komputerowych (ECDL).

Po zatrudnieniu na Uniwersytecie Śląskim prowadziłem zajęcia dla studentów I i II stopnia studiów stacjonarnych na Wydziale Informatyki i Nauki o Materiałach (obecnie Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych) na kierunkach: Inżynieria Materiałowa oraz Inżynieria Biomedyczna. Zajęcia dydaktyczne prowadziłem również w Ośrodku Dydaktycznym Uniwersytetu Śląskiego w Rybniku na kierunku: Filologia Polska. Prowadziłem 6 autorskich wykładów w języku polskim z następujących przedmiotów: Zasady projektowania i doboru materiałów, Bazy danych o materiałach, Projektowanie i grafika inżynierska, Metody tribologiczne w analizie warstwy wierzchniej biomateriałów, Materiały inżynierskie, Projektowanie i wytwarzanie materiałów inżynierskich. Ponadto prowadziłem 2 autorskie wykłady w języku angielskim w ramach programu Erasmus z przedmiotów: Principles of Materials Designing and Selection oraz Designing and Engineering Graphics. Wygłosiłem również 3 wykłady oraz prowadziłem warsztaty komputerowe na Uniwersytecie Trzeciego Wieku prowadzonym przy Uniwersytecie Śląskim.

Dodatkowo prowadziłem 8 autorskich ćwiczeń laboratoryjnych z przedmiotów: Zasady projektowania i doboru materiałów, Bazy danych o materiałach, Materiały inżynierskie, Metody tribologiczne w analizie warstwy wierzchniej biomateriałów, Projektowanie i grafika inżynierska, Projektowanie i wytwarzanie materiałów inżynierskich, Kształtowanie struktury i właściwości materiałów, Technologia informacyjna. Do ćwiczeń laboratoryjnych modułów: Zasady projektowania i doboru materiałów, Bazy danych o materiałach, Projektowanie i grafika inżynierska, Materiały inżynierskie, Projektowanie i wytwarzanie materiałów inżynierskich opracowałem instrukcje do ćwiczeń.

Zajęcia dydaktyczne, które prowadziłem na Wydziale są bardzo dobrze oceniane przez studentów, co jest potwierdzone corocznie wysoką oceną w procesie ankietyzacji przeprowadzanej przez Uniwersytet Śląski. Średnia wyników z ankiet za lata 2016-2020 wynosiła 4,7.

W latach 2010-2020 byłem promotorem 6. prac dyplomowych inżynierskich oraz 2. prac dyplomowych magisterskich. Byłem ponadto opiekunem 3. prac inżynierskich oraz 1. pracy magisterskiej. Prace dyplomowe były realizowane w Instytucie Nauki o Materiałach Uniwersytetu Śląskiego (obecnie Instytut Inżynierii Materiałowej) z zakresu inżynierii materiałowej.

Oprócz działalności dydaktycznej w macierzystej jednostce od kilku lat współpracuję z Akademią WSB w Dąbrowie Górniczej. Zajęcia dydaktyczne dla studentów I i II stopnia realizowałem na następujących kierunkach: Transport, Inżynieria zarządzania i Logistyka. Prowadziłem autorskie wykłady oraz ćwiczenia z przedmiotów: Nauka o materiałach, Podstawy konstrukcji maszyn, Techniki i technologie wytwarzania z elementami nauki o materiałach.

#### Działalność organizacyjna

Równoległe do pracy naukowej, współpracy ze środowiskiem inżynierskim oraz działalności dydaktycznej prowadziłem i prowadzę działalność organizacyjną. Przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora, pełniłem co roku obowiązki stałego członka Uczelnianej Komisji Rekrutacyjnej na Wydziale Transportu Politechniki Śląskiej. Byłem również przez kilka lat członkiem Komisji ds. Rozkładu Zajęć. Brałem także czynny udział w organizacji kilku konferencji naukowych.

Obecnie na Wydziale Nauk Ścisłych i Technicznych Uniwersytetu Śląskiego pełnię funkcję koordynatora ds. osób niepełnosprawnych przez co podejmuję działania mające na celu podniesienie jakości uczestniczenia w procesie kształcenia studentów z niepełnosprawnością



oraz monitoruję potrzeby studentów i udzielam im porad we wszystkich sprawach związanych z przebiegiem studiów. Po przeniesieniu w 2012 roku Instytutu Nauki o Materiałach z Katowic do Chorzowa współorganizowałem pracę laboratoriów badawczych w nowej siedzibie. Od 2017 roku jestem członkiem Polskiego Towarzystwa Tribologicznego. W tym samym roku zorganizowałem pokazy sprzętu badawczego dla pracowników Instytutu Nauki o Materiałach oraz byłem współorganizatorem Dni Otwartych Instytutu Nauki o Materiałach. W listopadzie 2017 roku byłem również współopiekunem naukowym stażystki pochodzącej z Turcji.

#### Działalność popularyzatorska nauki

W zakresie działalności popularyzatorskiej nauki brałem udział w licznych imprezach promujących naukę takich jak: Śląski Festiwal Nauki, Chorzowski Festiwal Nauki, Święto Liczby Pi, Dni Otwarte Instytutu Nauki o Materiałach. Na Śląskim Festiwalu Nauki w 2017 roku wygłosiłem wykład pt. „Rola materiałów inżynierskich oraz modelowania numerycznego w rozwoju transportu szynowego”, który spotkał się z bardzo pozytywnym odbiorem wśród słuchaczy festiwalu. Na pozostałych imprezach popularnonaukowych (Chorzowski Festiwal Nauki, Święto Liczby Pi) prowadziłem warsztaty laboratoryjne z zakresu badań właściwości mechanicznych i tribologicznych materiałów inżynierskich. Prowadziłem również pokazy w ramach współpracy Instytutu Nauki o Materiałach ze szkołami ponadgimnazjalnymi.

#### **7. Inne informacje dotyczące kariery zawodowej**

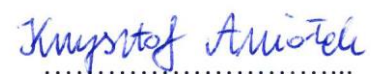
Poza aktywnością naukową omówioną we wcześniejszej części Autoreferatu, pełniłem również inne ważne funkcje w różnych obszarach mojej kariery zawodowej. W latach 2008-2012 pełniłem funkcję biegłego sądowego z zakresu transportu szynowego. Działalność ta polegała głównie na opracowaniu ekspertyz zleconych przez organy wymiaru sprawiedliwości. Jako biegły sądowy uczestniczyłem również w wizjach lokalnych, odtwarzaniu okoliczności zdarzeń oraz w rozprawach sądowych. Ponadto w latach 2005-2009 pełniłem funkcję audytora systemu zarządzania jakością. W 2012 roku byłem także ekspertem Komisji Konkursowej w Ministerstwie Gospodarki ds. oceny wniosków w ramach działania 4.5 Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka (2007-2013). Jako ekspert dokonywałem oceny merytorycznej wniosków w zakresie kryteriów dotyczących innowacyjności oraz uczestniczyłem w obradach Komisji Konkursowej.

Brałem udział w dwóch dużych przedsięwzięciach dotyczących modernizacji infrastruktury tramwajowej. W latach 2008-2009 uczestniczyłem w opracowaniu studium wykonalności dla przedsięwzięcia "Program inwestycyjny rozwoju trakcji szynowej w latach 2008-2013". Z kolei w 2011 roku brałem udział w opracowaniu audytu energetycznego dla

zadania „Modernizacja infrastruktury tramwajowej i trolejbusowej w Aglomeracji Górnośląskiej wraz z infrastrukturą towarzyszącą”. W ramach realizowanych zadań opracowałem analizę stanu technicznego infrastruktury torowej oraz uczestniczyłem w badaniach poboru energii elektrycznej różnych typów tramwajów.

Jestem również ekspertem w zakresie diagnostyki infrastruktury torowej. Posiadam wieloletnie doświadczenie w badaniach stanu technicznego torów i rozjazdów (tramwajowych i kolejowych). Posiadam również doświadczenie w zakresie budowy i eksploatacji pojazdów szynowych. Moja działalność w tym obszarze skupiała się m.in. na ocenie jakości kolejowych zestawów kołowych oraz zużycia powierzchni toczonej kół kolejowych. Ponadto brałem udział w badaniach lokomotyw elektrycznych na potrzeby uzyskania świadectwa dopuszczenia do eksploatacji. Byłem także ekspertem w zakresie oceny stanu technicznego wagonów tramwajowych. Jestem współautorem wielu ekspertyz i opinii z zakresu transportu szynowego obejmujących ustalenie przyczyn uszkodzenia elementów pojazdów szynowych, analizę i przebieg wykolejeń oraz ocenę stanu technicznego infrastruktury torowej. Posiadam również doświadczenie w zakresie pomiarów hałasu w środkach transportu.

Moim priorytetem jest stałe dążenie do podnoszenia kwalifikacji poprzez rozwój naukowy oraz udział w szkoleniach, co ma wymierny wpływ na jakość przekazywanej wiedzy studentom. Od początku kariery zawodowej brałem udział w licznych szkoleniach z zakresu komputerowego wspomaganie projektowania (CAD). Prowadziłem również szkolenia dla studentów z zakresu modelowania bryłowego i powierzchniowego, tworzenia złożeń z części, dokumentacji rysunkowej oraz modelowania numerycznego przy wykorzystaniu metody elementów skończonych. W 2009 roku uczestniczyłem aktywnie w międzynarodowych warsztatach zaawansowanych technik projektowania i weryfikacji konstrukcji w programach Catia V5 i V6. W latach 2016-2017 uczestniczyłem w cyklu szkoleń na poziomie podstawowym i zaawansowanym z zakresu projektowania w systemach: Autocad, ZwCAD, Fusion 360, Inventor Professional.



(podpis wnioskodawcy)